

*Ю.Л. САЄНКО, А.В. МОЛЧАН***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ПОТОКУ НА НЕСИНУСОЇДНІСТЬ НАПРУГИ В МЕРЕЖАХ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ**

У статті розглянуті основні причини спотворення синусоїдності кривої напруги в мережах з вітровими установками. Обґрунтовано необхідність визначення впливу турбулентного вітрового потоку на спотворення синусоїдності кривої напруги мережі. Розроблено імітаційну модель вітрової електростанції в пакеті Simulink, як джерела несинусоїдності і коливань напруги. Детально описано структуру моделі і методи моделювання: модель розподільної мережі, моделі механічного та електричного перетворення, збурюючий вплив. Представлені результати моделювання турбулентного вітрового потоку при зміні коефіцієнта загасання кореляційної функції і середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку. Представлені результати дослідження коефіцієнта нелінійних спотворень напруги для різних значень параметрів турбулентного вітрового потоку. Отримано залежності математичного очікування і середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень від коефіцієнта загасання кореляційної функції турбулентного вітрового потоку і від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку.

Ключові слова: турбулентний вітровий потік, вітроенергетична установка, імітаційне моделювання, якість електроенергії, несинусоїдність напруги, коефіцієнт нелінійних спотворень.

*Ю.Л. САЄНКО, А.В. МОЛЧАН***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

В статье рассмотрены основные причины искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с ветровыми установками. Обоснована необходимость определения влияния турбулентного ветрового потока на искажение синусоидальной кривой напряжения сети. Разработана имитационная модель ветровой электростанции в пакете Simulink, как источника несинусоидальности и колебаний напряжений. Детально описана структура модели и методы моделирования: модель распределительной сети, модели механического и электрического преобразования, возмущающее воздействие. Представлены результаты моделирования турбулентного ветрового потока при изменении коэффициента затухания корреляционной функции и среднеквадратичного отклонения турбулентного ветрового потока. Представлены результаты исследования коэффициента нелинейных искажений напряжения для разных значений параметров турбулентного ветрового потока. Получены зависимости математического ожидания и среднеквадратического отклонения коэффициента нелинейных искажений от коэффициента затухания корреляционной функции турбулентного ветрового потока и от среднеквадратического отклонения ветрового потока.

Ключевые слова: турбулентный ветровой поток, ветроэнергетическая установка, имитационное моделирование, качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, коэффициент нелинейных искажений.

*Y.L. SAYENKO, A.V. MOLCHAN***RESEARCH OF THE INFLUENCE OF WIND FLOW PARAMETERS ON NONSINUSOIDAL VOLTAGE IN A NETWORK WITH DISTRIBUTED GENERATION**

The article describes the main causes of the sinusoidal voltage curve distortion in networks with wind turbine. The necessity of determining the influence of the turbulent wind flow on the sinusoidal voltage curve distortion is substantiated. A simulation model of the wind power station in Simulink, as a nonsinusoidality and voltage fluctuations source has been developed. The model structure and modeling methods are described in detail: the distribution network model, mechanical and electrical conversion models, disturbing effects. The turbulent wind flow modeling results are presented when changing the damping coefficient of the correlation function and the standard deviation of a turbulent wind flow. The results of the total harmonic distortion research for different values of the turbulent wind flow parameters are presented. The dependences of the total harmonic distortion mean value and standard deviation on the damping coefficient of the correlation function and the standard deviation of a turbulent wind flow are obtained.

Keywords: turbulent wind flow, wind turbine, simulation modeling, power quality, voltage nonsinusoidality, total harmonic distortion.

Вступ. Зростання встановленої потужності джерел електроенергії з розподіленою генерацією, крім позитивного ефекту, пов'язаного зі зниженням шкідливих викидів в атмосферу, зниженням втрат електроенергії за рахунок максимальної наближеності таких джерел безпосередньо до споживачів, підвищенням ступеня резервування електропостачання і т.п., призводить і до ряду проблем, викликаних погіршенням якості електроенергії в розподільній мережі.

Наприклад, широке використання сучасних перетворювачів частоти в вітроустановках з асинхронними генераторами подвійного живлення

призводить до збільшення вмісту в кривій напруги мережі вищих гармонік, субгармонік, інтергармонік і високочастотних складових напруги з частотою в декілька кГц. Так в [1] наведені результати порівняльного моделювання основних типів вітроустановок, згідно яких джерелами спотворень гармонічного спектру напруги розподільчої мережі у вітроустановках є перетворювачі частоти.

Також, значний вплив на несинусоїдність напруги мережі в точці загального підключення вітроустановки має турбулентний вітровий потік, як збурюючий вплив для вітроустановки, тобто будь-які коливання вітру будуть відображатися в посиленій формі на механічній

потужності, переданій на вал турбіни, і звідти на вихід генератора, що призведе до коливань активної і реактивної потужності вітроустановки [2].

Високий рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі робить негативний вплив на ізоляцію електрообладнання, збільшує ризик виникнення резонансних явищ, що призводять до виходу з ладу електрообладнання (перш за все, конденсаторів, використовуваних для компенсації реактивної потужності), погіршує роботу систем зв'язку, вимірювального обладнання, електронних лічильників, модулів мікропроцесорного захисту з програмованими логічними контролерами та ін. [3].

Беручи до уваги вищесказане, необхідно визначити який безпосередній вплив в спотворення синусоїдності кривої напруги мережі має турбулентний вітровий потік і яка залежність зміни коефіцієнта нелінійних спотворень кривої напруги мережі від параметрів турбулентного вітрового потоку.

Метою роботи є дослідження впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги в мережах з вітроустановками та виявлення залежності між змінами параметрів вітрового потоку і коефіцієнта нелінійних спотворень.

Імітаційне моделювання вітрової електростанції. Для детального дослідження режимів роботи вітроустановки і проблеми якості електроенергії в мережах з вітровими електростанціями в графічному середовищі Simulink була розроблена імітаційна модель вітрової електростанції, як джерела несинусоїдності і коливань напруги.

Імітаційна модель вітрової електростанції складається з моделі розподільної мережі 110/35 кВ, 35/0.69 кВ, моделі вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти, і блока, який задає збурюючий вплив для системи, тобто задає характеристики вітрового потоку.

Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink наведена на рис. 1 і представляє собою джерело змінної напруги 110 кВ, знижувальну підстанцію 110/35 кВ, підстанцію 35/0,4 кВ до якої підключене навантаження 2 МВА і підстанцію 35/0.69 кВ до якої підключена вітрова електростанція.

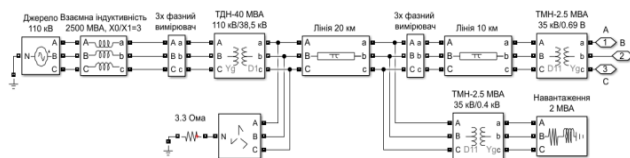


Рисунок 1 – Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink

Модель вітроустановки в графічному середовищі Simulink представлена у вигляді двох систем перетворення:

1. Механічне перетворення – перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічний обертальний момент на валу ротора генератора;

2. Електричне перетворення – перетворення обертального моменту на валу ротора генератора в електричну енергію, що віддається в мережу.

Сучасні системи механічного перетворення для всіх типів вітроустановок є практично однаковими і включають в себе: турбіну, трансмісію і систему керування. Відмінність може полягати у відсутності трансмісії. На рис. 2 наведена модель механічної системи перетворення в графічному середовищі Simulink [4].

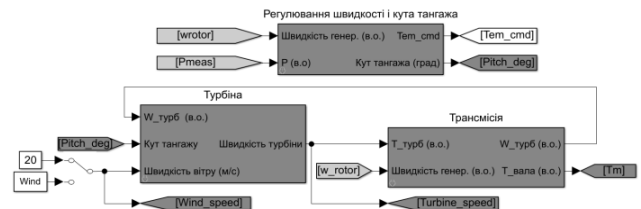


Рис. 2 – Модель системи механічного перетворення в графічному середовищі Simulink

Для моделювання роботи турбіни використовується рівняння (1), яке описує процес отримання енергії повітряного потоку [5]

$$P_M = \frac{\rho}{2} A_R V_w^3 c_p(\lambda, \beta), \quad (1)$$

де P_M – механічна потужність турбіни (Вт);

ρ – щільність повітря (кг/м³);

V_w – швидкість вітру (м/с);

A_R – ометаєма площа несучого гвинта (м²);

c_p – коефіцієнт продуктивності турбіни;

λ, β – швидкохідність турбіни і кут нахилу лопаті (град).

Залежність $c_p(\lambda, \beta)$ відображає енергетичну характеристику продуктивності турбіни. Для моделювання дану характеристику можна апроксимувати аналітичною функцією (2) [6].

$$c_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

де $c_1 = 0.5$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 0$, $c_5 = 5$, $c_6 = 21$

На рис. 3 наведені характеристики $c_p - \lambda$ для різних значень кута тангажу β .

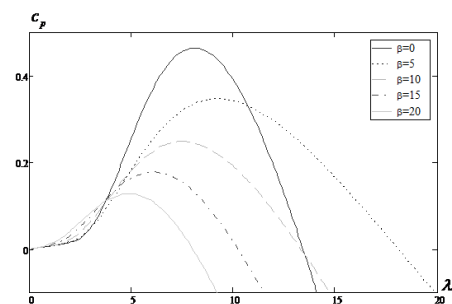


Рис. 3 – Апроксимація характеристик $c_p - \lambda$

При аналізі роботи трансмісії, згідно [7], для моделювання взаємозв'язку між високою і низькою швидкістю вала досить використовувати механічну двомасову модель. Дана модель (рис. 4) являє собою два диски, з'єднані пружиною з певною жорсткістю K_s і демпфером з коефіцієнтом демпфірування D_m . Ротор турбіни і генератор представлені коефіцієнтами інерції H_t і H_g (4-7).

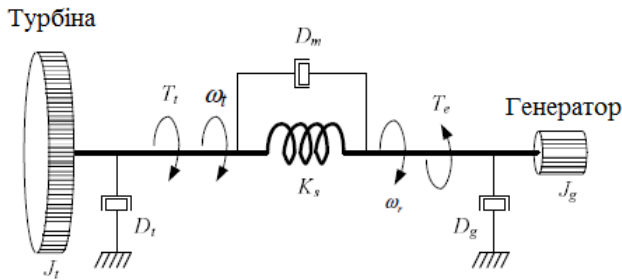


Рис. 4 – Двомасова структурна модель трансмісії

$$2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - K_s(\theta_r - \theta_t) - D_m(\omega_r - \omega_t); \quad (4)$$

$$2H_g \frac{d\omega_r}{dt} = -T_e + K_s(\theta_r - \theta_t) + D_m(\omega_r - \omega_t); \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \omega_t; \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r; \quad (6)$$

де ω_t , ω_r – швидкість обертання ротора турбіни і ротора генератора;

T_t , T_g – крутний момент ротора турбіни і ротора генератора;

θ_t , θ_g – кут ротора турбіни і генератора відповідно.

Система керування турбіною визначає і регулює швидкість генератора близько значення номінальної швидкості, згладжуючи коливання електричної потужності, викликані коливаннями потужності вала турбіни. Значення номінальної швидкості зазвичай становить 1.2 в.о, проте дана величина знижується при значеннях потужності нижче 75%. Для реалізації в моделі даної поведінки системи використовується рівняння

$$\omega_{ном} = -0.67P_M^2 + 1.42P_M + 0.51, \quad (8)$$

Регулювання швидкості турбіни відбувається за рахунок зміни кута нахилу лопатей турбіни і дає можливість:

оптимізувати потужність турбіни за рахунок вилучення максимальної потужності для конкретної сили вітру (використовується при $V_{wind} < V_{ном}$);

обмежити механічну потужність турбіни, тобто зупинити роботу вітроустановки при значеннях потужності, що перевищують номінальне значення.

Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти представлена на рис. 5 і включає в себе: генератор, перетворювач частоти і систему керування перетворювачем.

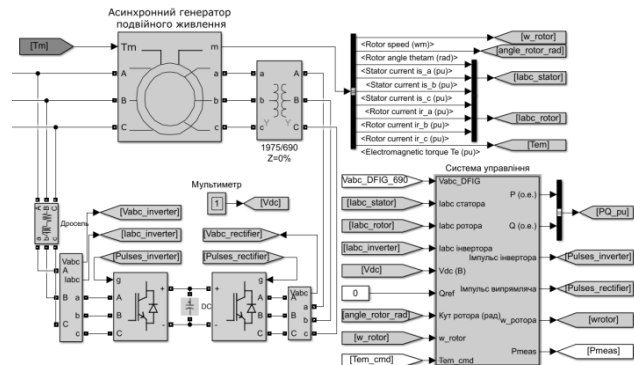


Рис. 5 – Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти

Особливістю даної концепції є застосування асинхронного генератора подвійного живлення (DFIG), що має роздільне живлення обмоток статора і ротора. Статор підключається безпосередньо в мережу, а ротор – через перетворювач частоти, що дає можливість керувати частотою обертання ротора. Даний принцип дозволяє регулювати швидкість вітроустановки в діапазоні $\pm 30\%$ від синхронної швидкості генератора, відповідно потужність перетворювача значно менше, ніж в інших типах вітроустановки, і становить (25-30)% від потужності генератора, що робить цю концепцію привабливою з економічної точки зору [8].

Перетворювач подає напругу на затискачі ротора, забезпечуючи роботу зі змінною швидкістю і незалежне керування активною і реактивною потужністю генератора.

Залежно від амплітуди і фази напруги ротора генератор може працювати в субсинхронному або понадсинхронному режимі. У субсинхронному режимі роботи перетворювач подає живлення на ротор, а при понадсинхронному потужність ротора подається через перетворювач назад в мережу. Таким чином, потік потужності в перетворювачі двонаправлений, отже перетворювач повинен складатися з самокомутованих напівпровідників, що дозволяють протікати потоку потужності в обох напрямках.

Модель генератора подвійного живлення аналогічна стандартній моделі асинхронного генератора з фазним ротором.

У вітроустановках з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти зазвичай використовують дворівневий перетворювач з ланкою постійного струму, що є комбінацією випрямляча з проміжною ланкою постійного струму і автономного інвертора [9, 10]. Даний перетворювач здатний генерувати потужність як в суб-, так і в понадсинхронному режимі, що дозволяє цій системі відслідковувати оптимальну швидкість у більшому

діапазоні швидкостей, ніж інші типи перетворювачів [11].

Залежно від поставлених завдань в дослідженні впливу вітроустановки на енергосистему застосовується дві моделі перетворювача частоти (рис. 6): точна і наближена, основна відмінність яких в представленому діапазоні частот.

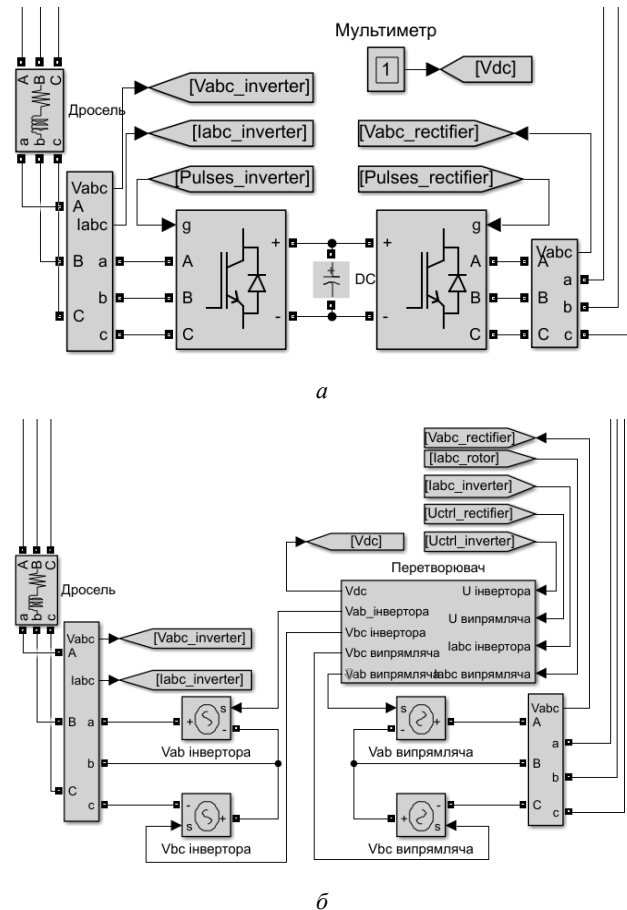


Рис. 6 – Моделі дворівневого перетворювача частоти з ланкою постійного струму:
а – точна модель, б – наближена модель

Точна модель детально описує роботу перетворювача частоти на IGBT транзисторах, що дозволяє спостерігати динаміку роботи системи керування і досліджувати несинусоїдність напруги. Для досягнення прийнятної точності моделювання необхідно здійснювати з відносно малим кроком дискретизації $\Delta t = 5 \mu\text{с}$.

У наближеній моделі детальне уявлення перетворювача частоти на IGBT транзисторах замінюється на еквівалентні джерела напруги, що генерують усереднене значення змінної напруги за один цикл перемикання. Точності даної моделі досить для дослідження динаміки роботи системи керування і дослідження несиметрії струмів і напруг, проте вона не відображає гармонійні коливання. Крок дискретизації для цієї моделі може бути збільшений до мілісекунд, що дозволить провести моделювання для більшого проміжку часу.

Система керування перетворювачем реалізована за допомогою методу векторного керування в системі

координат d-q окремо для системи керування випрямляча (СКВ) і системи керування інвертора (СКИ). СКИ регулює напругу ланки постійного струму і оптимізує переток реактивної потужності між СКВ і СКИ в сталому режимі і при збоях в мережі. СКВ контролює активну і реактивну потужність вітроустановки, і відстежує швидкість генератора для оптимальної генерації енергії в залежності від швидкості вітру.

Збурюючий вплив в моделі вітрової електростанції задається за допомогою блока зчитування даних з робочого простору середовища програмування MATLAB «From workspace». В якості збурюючого впливу вітроустановки використовуються результати моделювання турбулентного вітрового потоку, яке було виконано в середовищі програмування MATLAB.

В якості основної характеристики при моделюванні турбулентного вітрового потоку використовується кореляційна функція, отримана шляхом апроксимації спектральної щільності моделі Каймала, яка має достатню точність, відповідає вимогам і рекомендована міжнародним стандартом [2,5]. Кореляційна функція моделі Каймала має вигляд

$$K_1(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}, \quad (9)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення кореляційної функції,

α – коефіцієнт загасання кореляційної функції.

Запропонований алгоритм моделювання турбулентного вітрового потоку заснований на моделюванні за допомогою рекурентних різницьових рівнянь, який придатний для моделювання випадкових процесів з раціональним спектром. В основі даного алгоритму лежить лінійне перетворення дискретного білого шуму $x(i)$ з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією в послідовність, корельовану за нормальним законом розподілу [2, 12]. Для реалізації даного алгоритму використовується рівняння

$$v(i) = a_0 x(i) + a_1 x(i-1) - b_1 v(i-1) - b_2 v(i-2) \quad (10)$$

де a_0, a_1, b_1, b_2 – параметри алгоритму

Вихідними даними для моделювання є: середня швидкість вітру в регіоні V_{cp} ; середньоквадратичне відхилення σ , залежне від категорії турбулентності; коефіцієнт загасання кореляційною функцією α , кроку дискретизації Δt [2].

Результати моделювання. Моделювання турбулентного вітрового потоку проводилось для різних значень коефіцієнта загасання кореляційної функції та середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку на інтервалі часу $t=40$ с з кроком дискретизації $\Delta t=0,1$ с. При оцінці результатів моделювання були виключені початкові 10 секунд через протікання перехідного процесу.

Нижче наведено приклади моделювання турбулентного вітрового потоку для коефіцієнта

загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$ (рис.7) і для середньоквадратичного відхилення кореляційної функції $\sigma_V = 3.5$ м/с (рис.8).

Для досягнення прийнятної точності результатів моделювання при дослідженні несинусоїдності напруги, моделювання роботи вітроустановки в графічному середовищі Simulink здійснювалось з відносно малим кроком дискретизації $\Delta t = 5$ мкс. Приклад вимірних 3-хфазних струмів та напруг мережі на стороні 35 кВ в точці загального підключення для коефіцієнта загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$ наведено на рис. 9 у в.о.. Результати моделювання зберігаються у вигляді масиву даних в робочому просторі середовища програмування MATLAB для подальшої обробки.

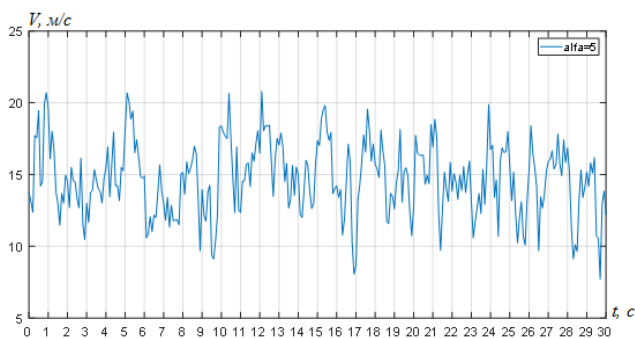


Рис. 7 – Змодельований турбулентний вітровий потік при коефіцієнті загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$;

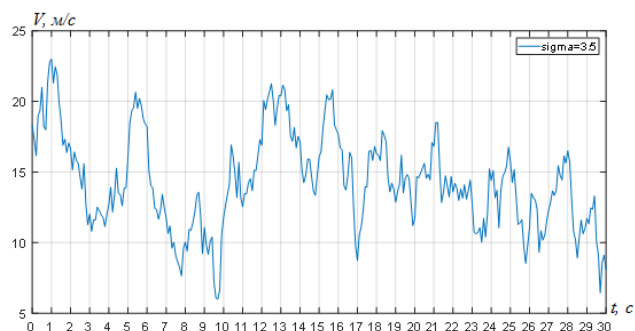


Рис. 8 – Змодельований турбулентний вітровий потік при середньоквадратичному відхиленні $\sigma_V = 3.5$ м/с.

Дослідження несинусоїдності напруги мережі на стороні 35 кВ при зміні коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V та середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку σ_V проводились в робочому просторі середовища програмування MATLAB за допомогою вбудованого алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Алгоритм виконувався на інтервалі часу $t = 30$ с для кожних десяти періодів послідовно і визначав коефіцієнт нелінійних спотворень, згідно [13], до 40 гармоніки.

Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V наведені на рис. 10.

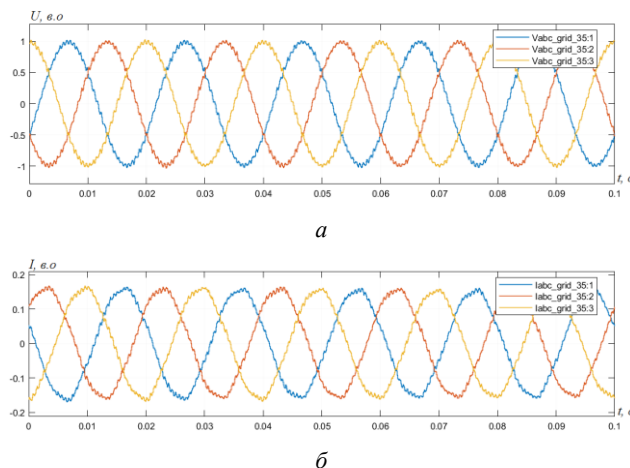


Рис. 9 – Параметри мережі 35 кВ в точці загального підключення:

a – 3-х фазні напруги; *б* – 3-х фазні струми.

Для оцінки впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги мережі на стороні 35 кВ були отримані залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку α_V (рис. 11, 12).

Як видно з рис. 11 та 12, при збільшенні значення коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V значення математичного очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги має незначні зміни, проте значення середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги істотно змінюється, тобто при збільшенні швидкості коливань турбулентності вітрового потоку збільшується рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі.

Проаналізуємо, також, вплив середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V на коефіцієнт нелінійних спотворень напруги.

Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V наведені на рис. 13.

Для оцінки впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги мережі на стороні 35 кВ були отримані залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V (рис. 14, 15).

Як видно з рис. 14 та 15, зміни значення математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги при збільшенні значення середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V мають той же характер, як і при збільшенні значення коефіцієнта загасання збільшенні значення коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V : значення математичного очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги має незначні зміни, проте значення середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень

напруги істотно змінюється. Тобто, при збільшенні розмаху коливань турбулентності вітрового потоку

збільшується рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі.

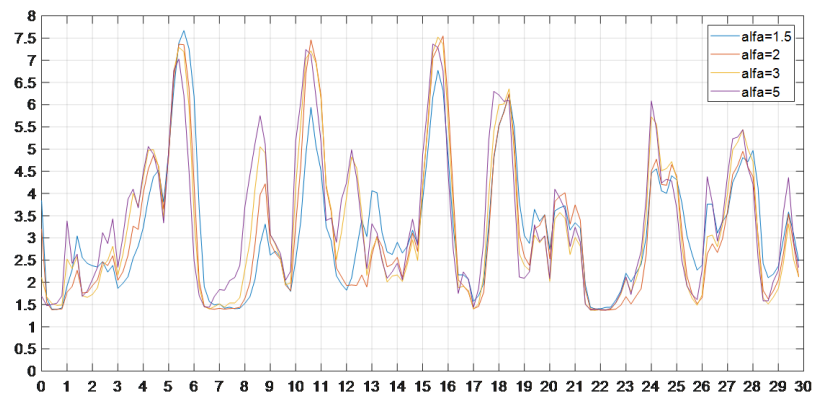


Рис. 10 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень коефіцієнта загасання кореляційної функції

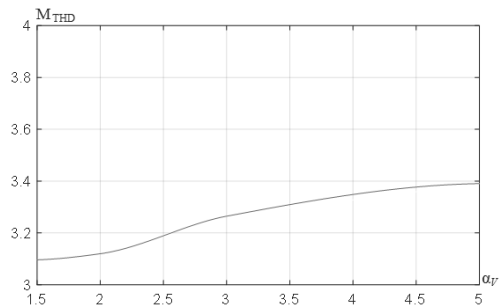


Рис. 11 – Зміни математичного очікування коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку

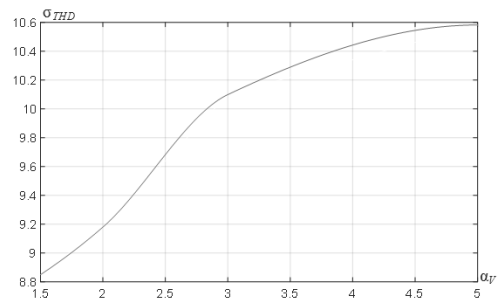


Рис. 12 – Зміни середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку

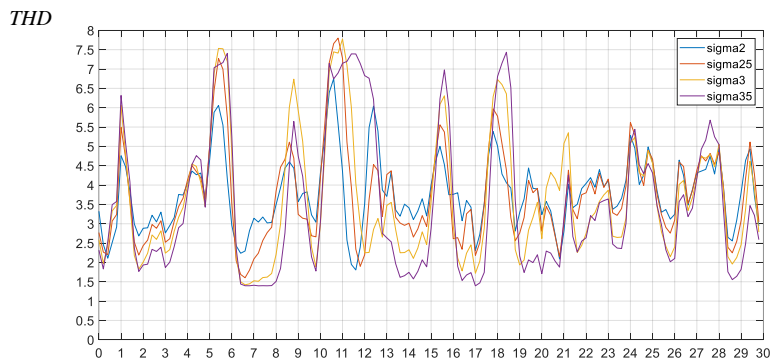


Рис. 13 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

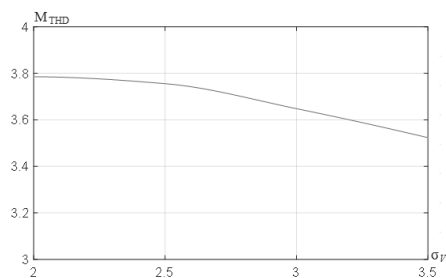


Рис. 14 – Зміни математичного очікування коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

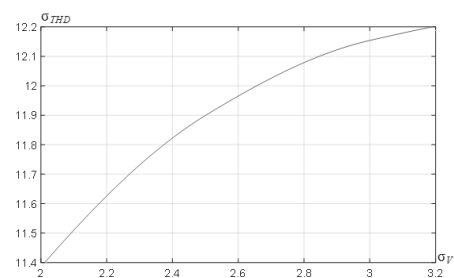


Рис. 15 – Зміни середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

Висновки. 1. Розроблена імітаційна модель вітрової електростанції в пакеті Simulink, яка дозволяє проводити дослідження несинусоїдності і коливань напруги мережі в точці загального підключення.

2. Отримано залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку α_V виходячи з яких збільшення швидкості коливань турбулентності вітрового потоку призводить до збільшення спотворень синусоїдності кривої напруги мережі.

3. Залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V свідчать про незначний вплив коливань швидкості вітрового потоку на математичне очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги. В той же час збільшення розмаху коливань турбулентності вітрового суттєво впливає на відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги відносно його математичного очікування M_{THD} .

Список літератури

1. Duong, M. Q., Le K. H., Grimaccia, F., Leva S., Mussetta M., Zich R. Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbine. IEEE 16th international conference on harmonics and quality of power, 2014, pp. 669-673.
2. Саенко Ю. Л., Молчан А. В. Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов при моделировании работы ветрогенераторов. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2017. Вип. 4/2017 (40). С. 61–67.
3. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л., Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. Москва: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
4. Erich Hau. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition. Heidelberg; Springer-Verlag Berlin, 2006. 783 p.
5. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
6. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
7. IEC 61400-27-1:2015 Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines
8. Ackermann T. Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 2012. 691 p.
9. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.. Power electronics converters for wind turbine systems. IEEE transactions on industry applications, 2012. pp. 708-719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2181290>
10. Blaabjerg F., Iov F., Chen Z., Ma K.. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. 2010 IEEE International Energy Conference . 2010.

Conference . 2010.

11. Rocabert, J., Luna A., Blaabjerg F., Rodriguez P.. Control of power converters in ac microgrids. IEEE transactions power Electronics. 2012. p. 4734-4749

12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. СПб.:БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

13. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності / Нац. стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

References (transliterated)

1. Duong, M. Q., Le K. H., Grimaccia, F., Leva S., Mussetta M., Zich R. Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbine. IEEE 16th international conference on harmonics and quality of power, 2014, pp. 669-673.
2. Sayenko Y. L., Molchan A. V. Primenenie spektralno-korrelyacionnoy teorii sluchaynih processov pri modelirovanii raboti vetrogeneratora [Application of the spectral-correlation theory of random processes in modeling the operation of wind generators]. Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemy. 2017, vol. 4/2017 (40), pp. 61–67.
3. Zhezhelenko I. V., Sayenko Y. L., Kachestvo elektroenergii na promishlennykh predpriyatiyah [Power quality in industrial enterprise]. Moscow: Energoatomizdat Publ, 2005. 261 p.
4. Erich Hau. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition. Heidelberg; Springer-Verlag Berlin, 2006. 783 p.
5. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
6. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
7. IEC 61400-27-1:2015 Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines
8. Ackermann T. Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 2012. 691 p.
9. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.. Power electronics converters for wind turbine systems. IEEE transactions on industry applications, 2012. pp. 708-719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2181290>
10. Blaabjerg F., Iov F., Chen Z., Ma K.. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. 2010 IEEE International Energy Conference . 2010.
11. Rocabert, J., Luna A., Blaabjerg F., Rodriguez P.. Control of power converters in ac microgrids. IEEE transactions power Electronics. 2012. p. 4734-4749
12. Sergienko A.B. Tsifrova obrabotka signalov; uchebnoe posobie [Digital signal processing; study guide]. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p.
13. DSTU: EN 50160-2014 *Harakteristika naprugi elektropostachannya v elektrichnih merezah zagalnogo pryznachennya* [State Standard EN 50160-2014. Characteristics of power supply voltage in electric networks of general purpose] / Kyiv: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2014. 27 p.

Надійшла (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саенко Юрій Леонідович (Саенко Юрий Леонидович, Sayenko Yuriy) – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», декан енергетичного факультету; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: yls62@i.ua

Молчан Андрій Валерійович (Молчан Андрей Валериевич, Molchan Andrii) – аспірант, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», асистент кафедри електроенергетичних комплексів та систем; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7399-2694>; e-mail: andre.molchan@gmail.com